

JAPAN PATENT OFFICE

(11)Publication number: 11-218627

(43)Date of publication of application: 10.08.1999

(51)Int. Cl.: G02B 6/122

(21)Application number: 10-21139

(22)Date of filing: 02.02.1998

(71)Applicant: NIPPON TELEGR & TELEPH CORP <NTT>

(72)Inventor: TACHIKAWA YOSHIAKI, KOBAYASHI JUNYA

[0004] FIGS. 10 and 11 are illustrations showing a conventional photonic crystal waveguide. A photonic crystal waveguide 1 includes a substrate 2 and a slab optical waveguide 3 provided on the surface of this substrate 2, and also has a structure in which a plurality of air holes 9 are provided in a lattice array on both sides of an optical waveguide area 6 along which light passing through the slab optical waveguide 3 is propagated. The refractive index of a portion at each air hole 9 is different from that of the corresponding portion of a core layer of the slab optical waveguide 3 due to air, and therefore the refractive-index-changed areas 13 are formed.

[0005] The slab optical waveguide 3 includes a lower clad layer 10, the core layer 11, and an upper clad layer 12. Each air hole 9 extends from the upper clad layer 12 of an upper layer up to the lower clad layer 10 of a lower layer to form a column space. Air is taken in this air hole 9, thereby causing the refractive index to be different from that of the core layer 11 of the slab optical waveguide 3.

[0006] Also, the lattice array of the air holes 9 satisfies Bragg conditions, thereby forming a photonic crystal that reflects and propagates only light of a predetermined wavelength.

[0007] When one end side of the optical waveguide area 6 of the photonic crystal waveguide 1 is connected to an input optical fiber 4 while the other end side thereof is connected to an output optical fiber 5, input light 7 is injected from the input optical

fiber 4 in the optical waveguide area 6, but only light of the wavelength satisfying the above Bragg conditions is extracted as output light 8 from the output optical fiber 5.

[0008] The air holes 9 are formed after the slab optical waveguide 3 is formed on the substrate 2 as illustrated in FIG. 12, through electron beam (EB: Electron Beam) lithography and reactive ion etching (RIE), for example. The diameter of each air hole 9 is 0.1-0.24 μm , its depth is 0.6-0.8 μm , and its pitch is 0.18-0.36 μm . Note that the upper end of each air hole 9 is open.

(11)特許出願公開番号

(43)公開日 平成11年(1999)8月10日

審査請求 未請求 請求項の数11 O.L (全 12 頁)

(74) 代理人 弁理士 秋田 収喜

Figure 1 is a schematic diagram of a light waveguide device. It shows a central rectangular region (1) surrounded by a grid of circular elements (2, 13). A vertical arrow (8) points upwards from a rectangular block (5, 6) at the top. A vertical arrow (7) points upwards from a rectangular block (3, 4) at the bottom. The right side is labeled "2 (シリコン基板)" and "13 屈折率変化領域". The bottom right is labeled "3スラブ光導波路 (石英ガラス)".

【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板の表面に誘電体スラブ光導波路を有するとともに前記スラブ光導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列状に配置されたフォトニック結晶構造が設けられたフォトニック結晶導波路であって、前記屈折率変化領域は前記スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光誘起効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項2】 コア層を下部クラッド層と上部クラッド層で挟みかついずれの層も有機薄膜で形成されるスラブ光導波路であって、前記スラブ光導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列状に配置されるとともに、前記屈折率変化領域のコア層は光誘起効果による屈折率変化処理によって形成されていることを特徴とするフォトニック結晶導波路。

【請求項3】 光が伝播する光導波領域の両側にそれぞれ屈折率変化領域が格子配列状に配置されていることを特徴とする請求項1または請求項2に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項4】 前記スラブ光導波路の一端側に沿って前記屈折率変化領域が格子配列状に配置されていることを特徴とする請求項1または請求項2に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項5】 前記スラブ光導波路の一端側に設けられた格子配列状の屈折率変化領域に平行にまたは垂直もしくは斜めに光が伝播する光導波領域が設定されていることを特徴とする請求項4に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項6】 前記屈折率変化領域による格子列は格子ピッチが異なる複数の格子列になっていることを特徴とする請求項1乃至請求項5のいずれか1項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項7】 前記格子列の単位格子は正多角形配列になっていることを特徴とする請求項1乃至請求項6のいずれか1項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項8】 前記屈折率変化領域のコア層の屈折率は屈折率変化領域から外れた領域のコア層の屈折率よりも大きく、その比屈折率差は $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度であることを特徴とする請求項1乃至請求項7のいずれか1項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項9】 前記スラブ光導波路はガラス光導波路または有機光導波路で構成されていることを特徴とする請求項1または請求項3乃至請求項8のいずれか1項に記載のフォトニック結晶導波路。

【請求項10】 前記請求項1乃至請求項9のフォトニック結晶導波路の製造方法であって、前記基板上に下部クラッド層、コア層、上部クラッド層からなるスラブ光

導波路を作製した後、電子線、SOR光、紫外線および近赤外線のうちいずれかを前記上部クラッド層を通して前記コア層に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて前記屈折率変化領域を作製することを特徴とするフォトニック結晶導波路の製造方法。

【請求項11】 前記請求項10の製造方法において、前記基板から下部クラッド層およびコア層ならびに上部クラッド層からなる有機光導波路を剥離させて前記請求項2に記載のフォトニック結晶導波路を製造することを特徴とするフォトニック結晶導波路の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明はフォトニック結晶導波路およびその製造方法に関し、たとえば、光通信システムや光交換システムあるいは光計測システムの分野において、光波長を透過（伝播光の波長透過）あるいは阻止（伝播光の波長制限）する光フィルタ、光合波分波器、光分散補償デバイス等に適用して有効な技術に関する。

【0002】

【従来の技術】光通信システム等に使用される光フィルタの一つとして、フォトニック結晶導波路が知られている。

【0003】フォトニック結晶導波路については、J.D. Joannopoulos他著“Photonic Crystals”Princeton University Press, 1995, pp94～pp104に記載されている。

【0004】図10および図11は従来のフォトニック結晶導波路を示す図である。フォトニック結晶導波路1は、基板2と、この基板2の表面に設けられたスラブ光導波路3とからなるとともに、前記スラブ光導波路3の光が伝播する光導波領域6の両側に格子配列状に複数の空気ホール9が設けられた構造になっている。この空気ホール9の前記スラブ光導波路3のコア層に対応する部分の屈折率は、空気故に異なり、屈折率変化領域13を構成することになる。

【0005】スラブ光導波路3は、下部クラッド層10、コア層11、上部クラッド層12からなり、前記空気ホール9は上層の上部クラッド層12から下層の下部クラッド層10にまで延在し、円柱空間を形成している。この空気ホール9内には空気が入り込み、屈折率がスラブ光導波路3のコア層11とは異なるようになっている。

【0006】また、空気ホール9の格子配列はブラッグ（Bragg）条件を満たし、所定の波長の光のみを反射させ伝播させるフォトニック結晶を構成する。

【0007】フォトニック結晶導波路1の光導波領域6の一端側に入力光ファイバ4を接続し、他端側に出力光ファイバ5を接続した場合、入力光ファイバ4から光導波領域6に入れられた入力光7は、前記ブラッグ条件を満たす波長の光のみが出力光8となって出力光ファイバ

5から取り出される。

【0008】前記空気ホール9は、図12に示すように、基板2上にスラブ光導波路3を形成した後、たとえば、電子ビーム（EB：Electron Beam）リソグラフィと反応性イオンエッチング（RIE）によって形成される。空気ホール9の直径は0.1～0.24μm、深さは0.6～0.8μm、ピッチは0.18～0.36μmである。なお、空気ホール9の上端は解放されている。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】従来のフォトニック結晶導波路の製造においては、基板2の表面にスラブ光導波路3を作製する場合、以下の方法で作製している。

【0010】（1）気相成長（MO-CVD）法あるいは液相成長（LPE）法などによって、スラブ光導波路3を構成する下部クラッド層10、コア層11、上部クラッド層12となる薄膜を順次作製する。

【0011】（2）石英ガラスなどでスラブ光導波路3を作製する際は、基板2上に作製したガラスを電気炉で焼結して透明化して作製する。

【0012】これらの方法において、基板2の温度は、前記MO-CVD法やLPE法では500～700℃程度になり、前記電気炉による焼結では約1300℃となり高温になる。

【0013】このような高温プロセスは制御が難しい。

【0014】一方、空気ホール9の作製は反応性イオンエッチング（RIE）によって行われるが、空気ホール9の直径がサブミクロンと小さいので円柱状にうまく加工するのが難しい。たとえば、空気ホール9直径が上部と底部で違ってしまい、所定のブラッグ条件を満たすように再現性良く空気ホール9を作製することは難しい。

【0015】さらに、薄膜作製加工、穴加工と加工工程が多くフォトニック結晶導波路の作製コストの低減が妨げられる。

【0016】以上のように、従来の製造方法によれば、プロセス制御が難しく、その結果再現性よく安定にフォトニック結晶導波路を実現することは容易でなかった。

【0017】本発明の目的は、伝播光の波長透過・波長制限特性が良好なフォトニック結晶導波路およびその製造方法を提供することにある。

【0018】本発明の他の目的は、伝播光の波長透過・波長制限特性が良好なフォトニック結晶導波路を再現性よくかつ安価に製造する方法を提供することにある。

【0019】本発明の前記ならびにその他の目的と新規な特徴は、本明細書の記述及び添付図面によって明らかにする。

【0020】

【課題を解決するための手段】本願において開示される発明のうち代表的なものの概要を簡単に説明すれば、下記のとおりである。

【0021】（1）基板の表面にスラブ光導波路を有するとともに前記スラブ光導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列（アレイ）状に配置されたフォトニック結晶構造が設けられたフォトニック結晶導波路であって、前記屈折率変化領域は前記スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光誘起効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されている。光が伝播する光導波領域の両側にそれぞれ屈折率変化領域が格子配列状に配置されている。前記格子列の単位格子は正多角形配列、たとえば三角形配列になっている。前記屈折率変化領域のコア層の屈折率は屈折率変化領域から外れた領域のコア層の屈折率よりも大きく、その比屈折率差は $10^{-4} \sim 10^{-2}$ 程度である。前記スラブ光導波路はガラス光導波路または有機光導波路で構成されている。

【0022】このようなフォトニック結晶導波路は、以下の方法で製造される。

【0023】基板上に下部クラッド層、コア層、上部クラッド層からなるスラブ光導波路を作製した後、電子線、SOR（synchrotron orbital radiation）光、紫外線および近赤外線の中のいずれかを前記上部クラッド層を通して前記コア層に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて前記屈折率変化領域を作製する。

【0024】（2）前記手段（1）の構成のフォトニック結晶導波路であり、このフォトニック結晶導波路はコア層を下部クラッド層と上部クラッド層で挟みかついずれの層も有機薄膜で形成されるスラブ光導波路構成である。

【0025】このようなフォトニック結晶導波路は、前記手段（1）の製造方法において、基板の表面に有機光導波路からなるスラブ光導波路を形成してフォトニック結晶導波路とした後、前記基板から有機光導波路を剥離させることによって製造する。

【0026】（3）前記手段（1）または手段（2）の構成において、前記スラブ光導波路の一端側に沿って前記屈折率変化領域が格子配列状に配置されている。前記スラブ光導波路の一端側に設けられた格子配列状の屈折率変化領域に平行にまたは垂直もしくは斜めに光が伝播する光導波領域が設定されている。

【0027】（4）前記手段（1）乃至手段（3）の構成において、前記屈折率変化領域による格子列は格子ピッチが異なる複数の格子列になっている。

【0028】前記（1）の手段によれば、（a）フォトニック結晶導波路の屈折率変化領域は、スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光誘起効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されている。このため、屈折率変化領域の深さ方向の各部の大きさは一定し、従来の空気ホールの場合のように上下で大きさが変化しないため、ブラッグ条件をよく満たすようにな

り、伝播光の波長制限あるいは波長透過が高精度に行えるようになる。したがって、たとえば、高性能な合波・分波素子として使用することができる。

【0029】(b)屈折率変化領域は正三角形格子配列となり、充分なるブラッグ条件を満たすため、高精度な伝播光の波長制限または波長透過を保証する。

【0030】(c)フォトニック結晶導波路の製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域は、電子線、SOR光、紫外線および近赤外線のうちいずれかを、スラブ光導波路の上部クラッド層を通してコア層に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて作製することから、高精度寸法でかつ深さ方向での各部の寸法が均一な屈折率変化領域を製造することができる。

【0031】(d)フォトニック結晶導波路はその製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域は、電子線、SOR光、紫外線および近赤外線のうちいずれかを、スラブ光導波路の上部クラッド層を通してコア層に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて作製し、従来のようなエッチング等の機械的加工を何ら必要としないため作製が極めて容易で製造コストの低減が達成できる。

【0032】(e)ガラス光導波路によるフォトニック結晶を作る際、特別な加工技術を要しないため大幅な低価格化、高信頼化、量産化を図ることができる。

【0033】(f)スラブ光導波路を有機光導波路で構成する場合、有機光導波路は低温プロセスになるため光導波路の作製が容易になり、製造コストの低減が図れる。

【0034】前記(2)の手段によれば、有機スラブ光導波路を基板から剥がした構造となることから、フォトニック結晶導波路の光導波するコア層の偏波無依存化が達成できる。

【0035】前記(3)の手段によれば、スラブ光導波路の一端側に沿って前記屈折率変化領域が格子配列状に配置されているとともに、前記屈折率変化領域による格子列(アレイ)に対して平行にまたは垂直もしくは斜めに光が伝播する光導波領域が設定されていることから、光導波路設計の自由度が高くなる。すなわち、前記格子列に垂直に光を進入させれば、出力光は格子列で折り返して出射される。また、格子列に対して斜めに光を進入させれば、出力光は格子列で反射して所定の角度を有して出射する。したがって、角度を選べば、光の伝播方向を直角に曲げることもできる。また、これらの光伝播方向の曲げの場合、その曲げ損失も小さくなる。

【0036】前記(4)の手段によれば、格子列を格子ピッチが異なる複数の格子列で形成しておくことによってチャージング特性の実現が可能になる。

【0037】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照して本発明の実

施形態を詳細に説明する。なお、実施形態を説明するための全図において、同一機能を有するものは同一符号を付け、その繰り返しの説明は省略する。

【0038】(実施形態1)図1乃至図4は本発明の一実施形態(実施形態1)であるフォトニック結晶導波路およびその製造方法に係わる図である。

【0039】本実施形態1のフォトニック結晶導波路1は、図1および図2に示すように、シリコンからなる基板(シリコン基板)2上に、スラブ光導波路3としてガラス光導波路を形成した構造になっている。

【0040】スラブ光導波路3は、図2に示すように、シリコン基板2上に順次形成された下部クラッド層10、コア層11、上部クラッド層12によって構成されるが、これらの層はいずれもSiO₂膜(石英ガラス、フッ化物ガラス等のガラス)で形成されている。

【0041】コア層11は屈折率を大きくするため、たとえばGeO₂を添加してある。

【0042】また、屈折率差を大きくするため、上部クラッド層12の形成後に、水素(H₂)加圧を行う。

【0043】スラブ光導波路3を構成する各層の厚さは、たとえば、以下の通りである。下部クラッド層10および上部クラッド層12の厚さは約15μm、コア層の厚さは数μmである。また、コアとクラッドの比屈折率差は0.3~1%程度である。

【0044】図2に示すように、中央線に沿う所定幅の領域が光導波領域6となり、この光導波領域6の両側に沿って格子配列(アレイ)状に屈折率変化領域13が設けられている。前記光導波領域6の幅は光ファイバとの接続を考えると数十μm~数十μmが好ましい。

【0045】図では屈折率変化領域13はそれぞれ3列設けられ、隣り合う列との間で正三角形格子(triangle lattice)からなる単位格子を構成している。したがって、2列配列により単位格子は形成されるが、3列にしてあることから屈折率変化領域13間からの光の漏れが防げ、光の閉じ込め効果が高くなる。さらに格子パターンによっては、光の閉じ込め効果を高めるために多くの列による配列を必要とする場合がある。

【0046】前記正三角形格子のピッチは、たとえば0.5μm、屈折率変化領域13の直径は0.45μmである。

【0047】前記屈折率変化領域13のコア層の屈折率は、屈折率変化領域13から外れるコア層の屈折率よりも大きくなり、たとえば比屈折率差は10⁻⁴程度になる。

【0048】これら屈折率変化領域13をスラブ光導波路3上に格子配列した結晶は、フォトニック結晶(2次元フォトニック結晶)14と呼称されている。

【0049】フォトニック結晶14は、外部からの高出力のたとえばエキシマレーザ等で発生する紫外(UV)光あるいは近赤外光を、スラブ光導波路3の表面に選択

的に照射して光誘起効果による屈折率変化をスラブ光導波路3のコア層内に生じさせることによって形成される。

【0050】このとき、半径 r の円柱状に屈折率が変化した微小な屈折率変化領域13を規則正しく整列させて、たとえば正三角形格子を構成させる。

【0051】結晶は原子あるいは分子の周期的な配列であり、結晶格子は原子あるいは分子の小さな基本的な構造が空間的に繰り返されているときに生じる。したがって、結晶は周期的なポテンシャルをその中を伝搬する電子に与え、結晶構造は導電性を支配する。特に、格子は結晶のエネルギーバンド構造にギャップを導入することができるので、原子からのブラッグ回折により一定のエネルギーをもった電子は一定の方向に伝播することを禁止される。

【0052】その光学的なアナロジーがフォトニック結晶であり、その周期的なポテンシャルは原子の代わりに巨視的な光半導体媒質あるいは誘電体媒質の格子により与えられる。したがって、フォトニック結晶においては、格子構造および格子定数で決定されるバンドギャップすなわちブラッグ回折による反射波長域が存在することになる。

【0053】また、屈折率の大きさは石英ガラスで1.46、後述するフッ素化ポリイミドで1.53である。屈折率変化は大きいほどよいが、これらの材料で実現できる現実的な屈折率増加量は 10^{-4} から 10^{-2} の範囲である。

【0054】フォトニック結晶では、一般に円柱状領域とそうでない領域との屈折率差が大きいことが望ましいが、従来技術では屈折率差が約0.7と1桁以上大きい分だけ同じ反射率を得るのに格子数を少なくできて有利である。

【0055】しかし、その反面、格子のピッチ、内径が小さくなり加工が難しくなるという欠点がある。

【0056】一方、本発明のように屈折率差が0.01と小さい場合は加工が容易となり、格子数を増やせば原理的に同様の効果が期待できる。

【0057】この様子をもう少し詳しく数学的に説明する。簡単のため、格子が直線導波路に沿って等間隔に並んだ1次元のブラッグ光導波路格子を例にとると、ブラッグ波長 λ_B における光電力反射率は $R = \tanh^2(\kappa L)$ で表され、モード結合係数 κ と格子の長さ L との積によって決まる。

【0058】このように、屈折率変化によって格子を形成する場合、一般に結合係数が小さいので、高反射率を得るには格子部の長さ L を大きくして格子をたくさん配置することが必要となることがわかる。

【0059】他方、前記フォトニック結晶導波路1の光導波領域6の一端側には入力光ファイバ4が接続され、他端側には出力光ファイバ5が接続されている。前記入

力光ファイバ4および出力光ファイバ5は、単一モードファイバまたは分散シフトファイバもしくは偏波保持ファイバ等で構成されている。たとえば、この実施形態では単一モードファイバが使用されている。

【0060】図1はフォトニック結晶導波路1の使用形態を模式的に示すものであるが、実際の製品としては、容器（パッケージ）内にフォトニック結晶導波路1が配置され、容器に設けられた光ファイバガイド等によってそれぞれ入力光ファイバ4や出力光ファイバ5が光ケーブルの状態等で支持される構成になる。また、フォトニック結晶導波路1は、OEICを構成するシリコン基板やガラス基板さらには化合物半導体基板の一部に形成される場合もある。

【0061】このようなフォトニック結晶導波路1では、入力光ファイバ4からの光（入力光7）が、結晶格子が存在しない光導波領域6の一端側に入力されると、前記入力光7はスラブ空間に広がって行くとき、屈折率変化領域13が存在するフォトニック結晶で反射あるいは透過される。その際に、いわゆるブラッグ条件を満たす波長の光のみが結晶で反射され、それ以外の波長の光は結晶を透過する。このとき、反射光は光学的な多光束干渉を生じる。その結果、ブラッグ条件を満たす波長の光はスラブ光導波路3の格子が無い部分に閉じ込められて光導波領域6を伝搬していくことが許される。

【0062】この多光束干渉は通過波長を制限する効果がある。この伝播波は、格子のピッチ a が波長の整数倍のとき強めあい、 $(1+1/2)$ 波長の整数倍のとき弱めあう。このような構成になっているため、従来技術に比べて容易に波長特性を有する光フィルタを実現することが可能である。

【0063】つぎに、このようなフォトニック結晶導波路1の製造方法について説明する。図3に示すように、シリコン基板2上に、火炎加水分解法やイオン交換法により石英(SiO_2)ガラスで下部クラッド層10、コア層11、上部クラッド層12を形成して2次元方向に光の閉じ込めのない、いわゆるスラブ構造のガラス光導波路3a（スラブ光導波路3）を作製する。なお、基板2は石英ガラス基板や他のガラス基板でもよい。

【0064】前記コア層11には屈折率を増大させるためにゲルマニウム(GeO_2)やリン(P)等の不純物をコア形成過程において予め添加しておく。本実施形態1では、たとえば GeO_2 を添加する。また、ガラス光導波路3aを形成した後に水素(H_2)加圧処理を施してもよい。

【0065】前記下部クラッド層10の厚さは約 $15\mu\text{m}$ 、コア層11の厚さは数 μm 、上部クラッド層12の厚さは約 $15\mu\text{m}$ である。また、コアとクラッドの比屈折率差は0.3~1%程度である。

【0066】つぎに、発振波長 248nm のKr-Fエキシマレーザ、 193nm のAr-Fレーザ、あるいは

YAGレーザ（第2あるいは第4高調波利用）などで発生する紫外パルス光（紫外光）20を、図4に示すように、ガラス製位相マスク21を介してスラブ光導波路3表面の上方から屈折率変化領域13を形成する部分に照射する。

【0067】照射物は、電子線、SOR光、紫外線、近赤外線の内いずれでもよい。

【0068】ここで使用する2次元ガラス製位相マスク21は、 $1/2$ 波長（位相にして π ）の深さの円形もしくは方形の穴22が、たとえばフォトリソグラフィと反応性イオンエッチング等で石英ガラス板23の2次元方向に形成配列されたものである。このガラス製位相マスク21の穴22のピッチは約 $1\mu\text{m}$ である。

【0069】これによって、 -1 次と1次の回折光同士が干渉し、位相マスクの表面の凹凸周期の $1/2$ の周期となる正弦波状の強度分布を有するピッチ $0.5\mu\text{m}$ の干渉縞がコア層11中に生成される。その結果、光誘起効果による屈折率変化を起こし、コアの屈折率が 10^{-4} オーダーで増加したピッチ $0.5\mu\text{m}$ の2次元格子がコア層11中に形成される。

【0070】一方、発振波長 810nm 付近の近赤外超短パルスレーザ光を照射した場合には、 10^{-4} オーダーのより大きな屈折率の増加をコア中に起こさせることもできる。この場合には、前述の理由によって格子数を減少できるため、結果として結晶サイズをおよそ2桁低減できる利点がある。

【0071】また、この場合は GeO_2 添加石英ガラスに限らず熔融石英ガラス、合成石英ガラス、フッ化物ガラス、カルコゲナイトガラスなどほとんど全てのガラスを使用できるという大きな利点がある。

【0072】紫外光照射により屈折率変化を生じさせるためのエネルギーは、平均光電力で $0.5\sim 1\text{W}$ 程度である。屈折率変化は干渉縞の正弦波状の光強度分布を反映するので円柱状にはならないが、コア層厚が数 μm 程度であればこの影響はほとんど無視できる。

【0073】また、ガラス光導波路3aの形成後に外部から紫外光20を照射しても、上部クラッド層12には GeO_2 が添加されていないので光誘起効果による屈折率変化は生じない。

【0074】また、 GeO_2 を添加しないガラスに近赤外光を照射する場合は、上部クラッド層も光誘起効果による屈折率変化が生じるが、光が伝播するのはコアなのでその影響はない。

【0075】他方、単位格子サイズは屈折率の違いから従来技術と変わる。空気ホールのない媒質の屈折率および空気ホールの屈折率が本発明と異なっていることから、本発明の場合には従来に比較して格子のサイズが大きくなる。

【0076】すなわち、前述のように本発明の場合には屈折率差が小さいためにモード結合係数が小さくなり、

高反射率を得るには格子サイズを大きくすることと格子数を多くする必要がある。たとえば、光が伝播する円柱状領域でない領域（光導波領域6）の両側に格子を各々 $100\text{個}\times 100\text{個}$ から $10000\text{個}\times 10000\text{個}$ ずつ設ければよい。その場合、格子が占有する面積がおおよそ $1\times 1\text{mm}^2$ から $100\times 100\text{mm}^2$ と大きくなるが基板サイズ（直径）が $1\sim 6$ インチ（ $25.4\text{mm}\phi\sim 152.4\text{mm}\phi$ ）であることを考えると実用上は全く問題がない。

【0077】このような結果から明らかなように、従来技術に比べて極めて簡単な製造プロセスによりフィルタ特性を持ったフォトニック結晶導波路を実現することができる。

【0078】本実施形態1によれば以下の効果を奏する。

【0079】（1）フォトニック結晶導波路1の屈折率変化領域13は、スラブ光導波路3（ガラス光導波路3a）のコア層11を構成する材質と同じ材質でかつ光誘起効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されている。このため、屈折率変化領域13の深さ方向の各部の大きさは一定し、従来の空気ホールの場合のように上下で大きさが変化しないため、ブラッグ条件をよく満たすようになり、伝播光の波長制限あるいは波長透過が高精度に行えるようになる。したがって、たとえば、高性能な合波・分波素子として使用することができる。

【0080】（2）屈折率変化領域13は正三角形格子配列となり、充分なるブラッグ条件を満たすため、高精度な伝播光の波長制限または波長透過を保証する。

【0081】（3）フォトニック結晶導波路1の製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域13は、電子線、SOR光、紫外線および近赤外線の内いずれかを、スラブ光導波路3の上部クラッド層12を通してコア層11に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて作製することから、高精度寸法でかつ深さ方向での各部の寸法が均一な屈折率変化領域を製造することができる。

【0082】（4）フォトニック結晶導波路1はその製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域13は、電子線、SOR光、紫外線および近赤外線の内いずれかを、スラブ光導波路3の上部クラッド層12を通してコア層11に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて作製し、従来のようなエッチング等の機械的加工を何ら必要としないため作製が極めて容易で製造コストの低減が達成できる。

【0083】（5）ガラス光導波路3aによるフォトニック結晶を作る際、特別な加工技術を要しないため大幅な低価格化、高信頼化、量産化を図ることができる。

【0084】（実施形態2）図5および図6は本発明の他の実施形態（実施形態2）であるフォトニック結晶導波路に係わる図である。

【0085】本実施形態2はスラブ光導波路3として有機光導波路3bを使用するフォトニック結晶導波路1の例である。

【0086】すなわち、本実施形態2が実施形態1と異なる点は、フォトニック結晶14を有するスラブ光導波路3として、フッ素化ポリイミド等の高分子材料を用いて有機光導波路3bを形成している点で、さらに電子線、紫外線あるいはSOR光を外部から有機光導波路3bに照射してコアの屈折率を変化させて屈折率変化領域13を格子配列状に形成した点である。

【0087】特に、SOR光照射による屈折率変化はガラス導波路に比べて2桁大きく 10^{-2} である。他の部分および動作は、前記実施形態1の場合と基本的には同じなので説明を省力する。

【0088】ただし、フォトニック結晶導波路1の光導波領域6の両端面、すなわちスラブ光導波路3の入力・出力端面は、図示はしないが反射防止のために無反射コートが施してある。無反射コート膜の一例としては、ターゲット材料として $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ を用い、それらにイオンビームを照射することによって光導波路端面に向けて飛散させて2層の無反射コーティングを施す。この方法で得られる反射率は約-30dB以下である。

【0089】また、反射防止の別の手段として、入射端面に斜め研磨を施してもよい。斜め研磨の角度は光の伝播方向に垂直な方向に対して8度以上である。この斜め研磨の代わりにダイシングソーで斜めに切断しても良い。これらの場合、-50~-60dBの高反射率が得られる。

【0090】本実施形態2のフォトニック結晶導波路1の製造方法について説明する。

【0091】本実施形態2では、シリコン基板2上に有機光導波路3bからなるスラブ光導波路3を形成した後、この有機光導波路3bに選択的にSOR (synchrotron orbital radiation) 光を照射して屈折率変化領域13を格子配列状に形成してフォトニック結晶14を形成する。

【0092】図示はしないが、シリコン基板2上に、フッ素化ポリイミドの前駆体であるフッ素化ポリイミド酸の溶液をスピンコートしてオープン中で380℃で加熱し下部クラッド層10を形成する(図6参照)。

【0093】つぎに、下部クラッド層10上へ、フッ素化ポリイミド酸の溶液をスピンコートしオープン中で380℃で加熱しコア層11を形成する(図6参照)。

【0094】つぎに、前記コア層11上に、前記下部クラッド層10と同じ屈折率を持つ上部クラッド層12を前記同様な方法で形成して有機光導波路(ポリマー光導波路)3bを作製する。このとき、各層の膜厚は前記実施形態1のガラス光導波路3aの場合とほぼ同じである。

【0095】この結果、屈折率が1.53の有機光導波

路3bが得られる。

【0096】このようなスラブ光導波路3の形成方法は、半導体の結晶成長の高温プロセスと比べて温度が低く低温プロセスとなる。低温プロセスによるスラブ光導波路の作製は容易であり、製造コストの低減が図れる。

【0097】また、この方法はスピンコートにより有機光導波路3bを容易に形成できるという他の材料にない優れた特徴がある。

【0098】つぎに、有機光導波路3b上にX線を透過する窒化シリコンのような薄膜を配置し、その上にタンタル、タングステンあるいは金等の重金属からなる厚さ約1μmのX線吸収体を設けた構造のX線マスクを介して極超短波長約0.7nmのSOR光を、照射量 10^4 (アンペア・秒)オーダで外部から有機光導波路3bに照射する。

【0099】ガラス製位相マスクの場合とは異なり、格子状に穴の空いたX線マスクを透過したSOR光は1つ1つが円柱状の強度分布をもつスポット光となってコア層11に照射される。その結果、コア層11に 10^{-2} オーダの大きな屈折率の増加した格子が形成される。

【0100】ここで、X線マスクの穴径は0.25μm、ピッチは0.5μmである。

【0101】この場合紫外光照射に比べて波長が極めて小さいので、微細加工が可能となり高精度をもって容易に格子をコアに書き込むことができるという優れた特徴がある。

【0102】本実施形態2では前記実施形態1が有する効果を同様に奏する。

【0103】(実施形態3)図7は本発明の他の実施形態(実施形態3)であるフォトニック結晶導波路の平面図である。

【0104】本実施形態3では、図7に示すように、屈折率変化領域13による単位格子を正六角形格子(hexagonal lattice)状に配列してある。

【0105】正六角形格子はTE偏光およびTM偏光に対して同じバンドギャップすなわちブラッグ反射波長を有するので極めて有効である。

【0106】なお、本発明では、単位格子として前述の正三角形格子や正六角形格子以外の正多角形格子でもよい。すなわち、単位格子を正方形格子、正八角形格子、正十二角形格子などの格子配列でもよい。また、屈折率変化領域13の列は、格子(格子列)を構成するために少なくとも2列必要である。

【0107】(実施形態4)図8は本発明の他の実施形態(実施形態4)であるフォトニック結晶導波路の概略を示す模式的平面図である。

【0108】本実施形態では、フォトニック結晶導波路1の光導波領域6の一側に沿って設けられる屈折率変化領域13による格子列を複数にした例であり、かつ複数の格子列G1、G2、G3の格子間隔(ピッチ)aを相

互に異なるようにした例である。これにより、通過帯域が広がるいわゆるチャージング特性を実現した例である。

【0109】特に限定はされないが、格子列G1、G2、G3のピッチを a_1 、 a_2 、 a_3 とした場合、 $a_1 > a_2 > a_3$ となっている例である。

【0110】チャージングとは格子のピッチをある割合で連続的に変化させたときに波長帯域が広がることを言う。格子ピッチのチャージングは細かく段階的に行う。格子のピッチが場所によって不等間隔になるように格子を配置した正三角形格子の場合について説明する。

【0111】たとえば、格子ピッチ a が a_1 、 a_2 、 a_3 、 \dots のように少しずつ小さくなる G_1 、 G_2 、 G_3 、 \dots の各格子領域では、各格子領域に応じてブラッグ反射波長 λ_B が λ_{B1} 、 λ_{B2} 、 λ_{B3} 、 \dots のように各々少しずつ小さくなる。この場合、微視的にはピッチが段階的に変化するので隣り合う各格子領域で格子不整合が生じる。この値は隣り合う格子領域の間では極めてわずかであるので、巨視的に見れば連続的に変化しているのと同じであると考えて問題ない。

【0112】このようにすると、ブラッグ反射波長が少しずつずれるので等価的にバンドギャップが広がる。すなわち、反射帯域が広がるいわゆるチャージング特性を実現できる利点がある。この効果は光ファイバで生じる波長分散の補償などに適用することができる。ここでは、格子のピッチが単調減少する例を示したが、ピッチが単調増加する場合にも同様の効果が生ずることは言うまでもない。

【0113】本実施形態4では光導波領域6の一侧にのみフォトニック結晶14を設けてある。換言するならば、スラブ光導波路3一端側に沿って屈折率変化領域13が格子配列状に配置されているとともに、前記屈折率変化領域13によるアレイに対して平行にまたは垂直もしくは斜めに光が伝播する光導波領域6が設定されている。

【0114】したがって、光（入力光）を格子列に平行に伝播させることができるとともに、光の入射方向を選択することによって光の取り出し方向を種々に変えることができる。

【0115】すなわち、前記格子列に垂直に光を進入させれば、出力光は格子列で折り返して出射される。また、格子列に対して斜めに光を進入させれば、出力光は格子列で反射して所定の角度を有して出射する。したがって、角度を選べば、光の伝播方向を直角に曲げることができる。また、これらの光伝播方向の曲げの場合、その曲げ損失も小さくなる。

【0116】本実施形態4によれば光導波路設計の自由度が高くなる。また、この構成はシリコン基板等に分岐や合流する光導波路に適用することにより、一層設計の自由度が高い。

【0117】前記複数の相互にピッチの異なる格子列は、光導波領域6の両側にそれぞれ設けてもよい。また光導波領域6の一部の長さ域に設けてもよい。

【0118】（実施形態5）図9は本発明の他の実施形態（実施形態5）であるフォトニック結晶導波路の一部を断面とした斜視図である。

【0119】本実施形態5のフォトニック結晶導波路1は、有機光導波路3bのみによって構成されたものである。

【0120】すなわち、フォトニック結晶導波路1は、前記実施形態2のフォトニック結晶導波路1において、シリコン基板2の上に形成した有機光導波路3b（スラブ光導波路3）を、酸溶液などを用いてシリコン基板2から剥離したものであり、使用においては支持部材で支えて使用するものである。

【0121】このようにスラブ光導波路3を基板2から剥離すると、基板2との熱膨張係数の違いからくる応力歪みが解放されるため複屈折による屈折率の偏波依存性が生じなくなる。したがって、本実施形態5のフォトニック結晶導波路1は支持部材に取り付けた状態において、機械的応力や熱応力が発生しない支持形態で取り付ける必要がある。

【0122】本実施形態5のフォトニック結晶導波路1によれば、偏波無依存化が達成できる。

【0123】以上本発明者によってなされた発明を実施形態に基づき具体的に説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能であることはいうまでもない。

【0124】たとえば、化合物半導体基板上に化合物半導体によってスラブ光導波路を形成するとともに、屈折率変化領域を格子配列したのものに対しても適用できる。

【0125】たとえば、GaAs基板上にGaAlAsによるスラブ光導波路3を形成したフォトニック結晶導波路の場合には、0.7～0.9 μm の短波長帯で使用でき、InP基板上にInGaAsP化合物半導体やあるいは、シリコン基板や石英ガラス基板等の上に石英ガラスや高分子材料を用いてスラブ光導波路3を形成したフォトニック結晶導波路の場合には、1.3～1.5 μm の長波長帯で使用することができる。

【0126】以上の説明では主として本発明者によってなされた発明をその背景となった利用分野である光の分波素子の製造技術に適用した場合について説明したが、それに限定されるものではなく、たとえば、合波素子製造技術などに適用できる。

【0127】本発明は少なくとも光導波路を有する素子、モジュール等には適用できる。

【0128】

【発明の効果】本願において開示される発明のうち代表的なものによって得られる効果を簡単に説明すれば、下記のとおりである。

【0129】(1) フォトニック結晶導波路の屈折率変化領域は、スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光誘起効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されている。このため、屈折率変化領域の深さ方向の各部の大きさは深さ方向の寸法をも含めて一定になることから、ブラッグ条件をよく満たすようになり、伝播光の波長制限あるいは波長透過が高精度に行えるようになる。したがって、たとえば、高性能な合波・分波素子として使用することができる。

【0130】(2) 単位格子が正六角形格子の場合、TE偏光およびTM偏光に対して同じバンドギャップとなり、伝播光の波長制限あるいは波長透過が高精度に行えるようになる。

【0131】(3) フォトニック結晶導波路の製造において、アレイ状に配置した屈折率変化領域は、電子線、SOR光、紫外線および近赤外線の中のいずれかを、スラブ光導波路の上部クラッド層を通してコア層に照射して光誘起効果による屈折率変化をコア層に選択的に生じさせて作製することから、高精度寸法でかつ深さ方向での各部の寸法が均一な屈折率変化領域を製造することができる。また、屈折率変化領域を作製するためにエッチング等の機械的加工を何ら必要としないため作製が極めて容易で製造コストの低減が達成できる。

【0132】(4) ガラス光導波路によるフォトニック結晶を作る際、特別な加工技術を要しないため大幅な低価格化、高信頼化、量産化を図ることができる。

【0133】(5) スラブ光導波路を有機光導波路で構成する場合、有機光導波路は低温プロセスになるため光導波路の作製が容易になり、製造コストの低減が図れる。

【0134】(6) 有機スラブ光導波路を基板から剥がした構造のフォトニック結晶導波路では、偏波無依存化が達成できる。

【0135】(7) 光導波領域の一侧または両側に設けられるフォトニック結晶の複数の格子列の格子ピッチをそれぞれ変えることによってチャージング特性の実現が図れる。

【0136】(8) スラブ光導波路の一端に沿って格子列を設けた構造のフォトニック結晶導波路では、格子列に対して平行にまたは垂直もしくは斜めに光を進入させることによって、光の伝播方向を変化させることができ

る。またこの場合、光の曲げ損失も小さいという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の一実施形態（実施形態1）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

【図2】本実施形態1のフォトニック結晶導波路を示す一部を断面とした斜視図である。

【図3】本実施形態1のフォトニック結晶導波路の作製において、半導体基板にスラブ光導波路を形成した状態を示す一部を断面とした斜視図である。

【図4】本実施形態1のフォトニック結晶導波路の作製において、半導体基板の表面に形成したスラブ光導波路に、コアの屈折率と異なる屈折率変化領域を格子状に配列形成する方法を示す模式的断面図である。

【図5】本発明の他の実施形態（実施形態2）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

【図6】本実施形態2のフォトニック結晶導波路を示す一部を断面とした斜視図である。

【図7】本発明の他の実施形態（実施形態3）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

【図8】本発明の他の実施形態（実施形態4）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す一部の構成図である。

【図9】本発明の他の実施形態（実施形態5）であるフォトニック結晶導波路の概略を示す一部を断面とした斜視図である。

【図10】従来のフォトニック結晶導波路の概略を示す構成図である。

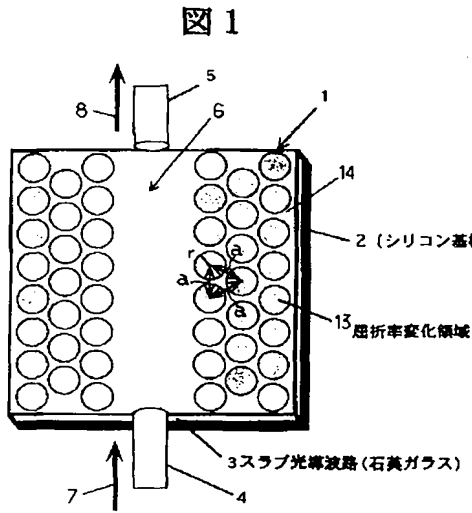
【図11】従来のフォトニック結晶導波路を示す一部を断面とした斜視図である。

【図12】従来のフォトニック結晶導波路の作製に使用する半導体基板を示す斜視図である。

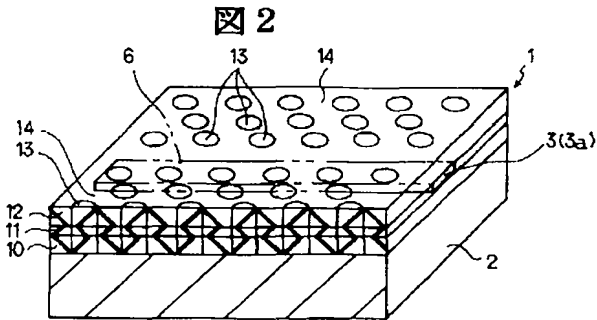
【符号の説明】

1…フォトニック結晶導波路、2…基板、3…スラブ光導波路、3a…ガラス光導波路、3b…有機光導波路、4…入力光ファイバ、5…出力光ファイバ、6…光導波領域、7…入力光、8…出力光、9…空気ホール、10…下部クラッド層、11…コア層、12…上部クラッド層、13…屈折率変化領域、14…フォトニック結晶、20…紫外光（紫外パルス光）、21…ガラス製位相マスク、22…穴、23…石英ガラス板。

【図1】

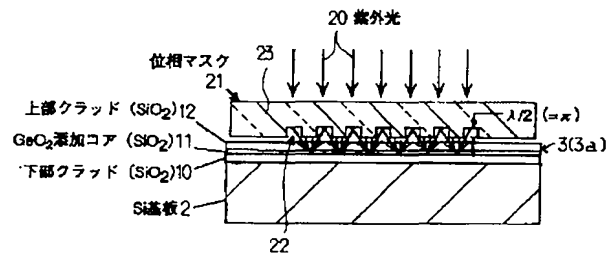


【図2】



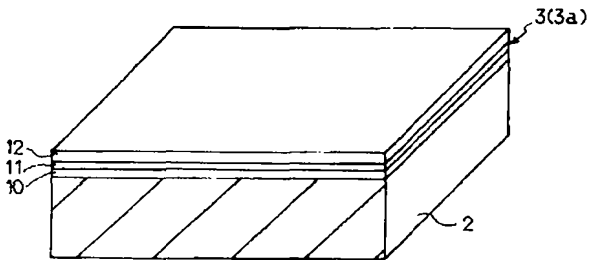
【図4】

図4



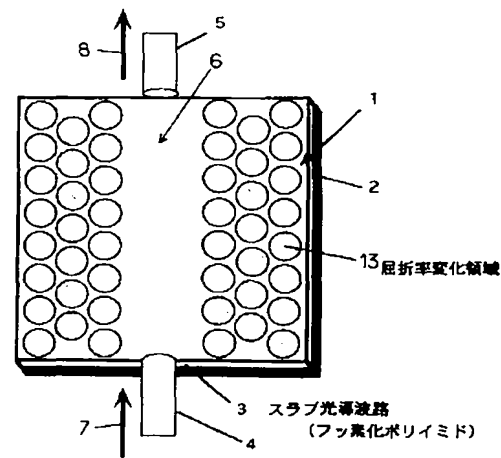
【図3】

図3



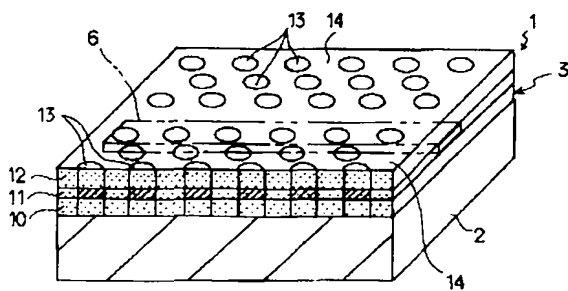
【図5】

図5

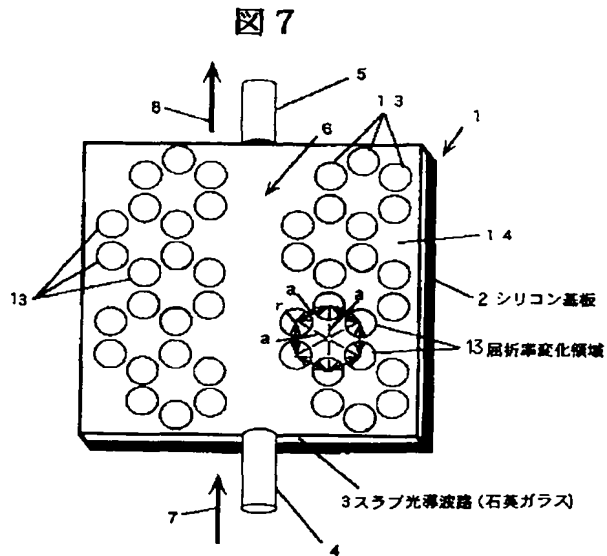


【図6】

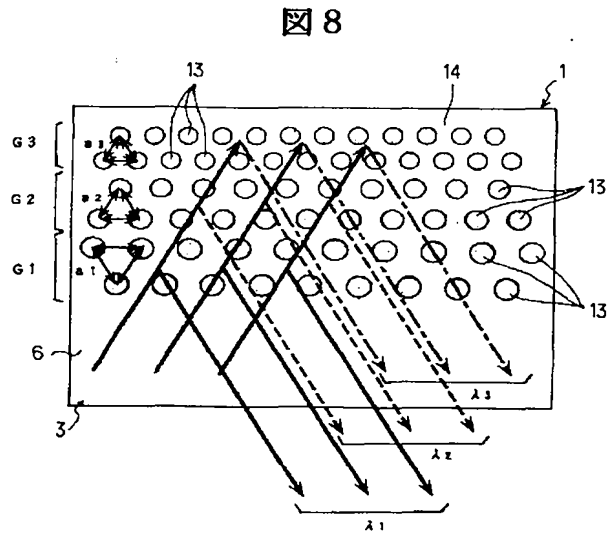
図6



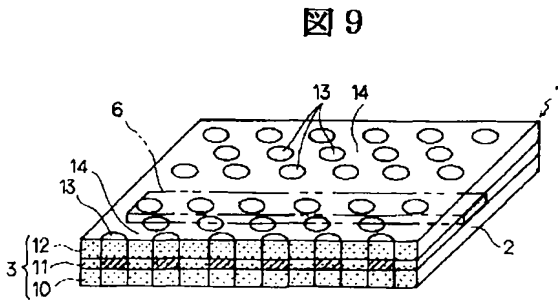
【図7】



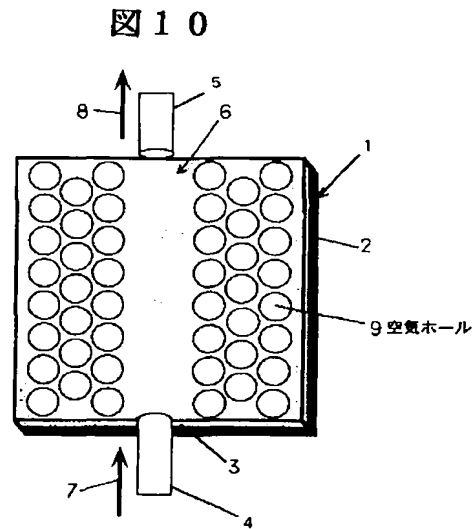
【図8】



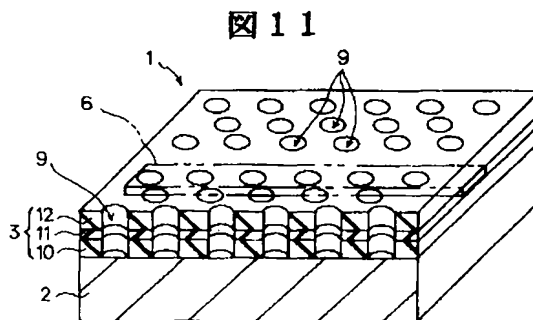
【図9】



【図10】



【図11】



(12)

特開平11-218627

【図12】

図12

